

УДК 624.91.02

В.І. Солодкий, Є.В. Довжик

ФОРМУВАННЯ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ КОНІЧНОЮ ПЕРВИННОЮ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Вступ

Утворення гвинтових поверхонь за допомогою інструменту конічної форми знайшло широке застосування при обробці гвинтових стружкових канавок на багатозубому металорізальному інструменті. Особливо часто цей метод використовується при шліфуванні канавки абразивними кругами. У той же час, профіль початкової інструментальної поверхні (ППП) ні в одному своєму перерізі не збігається з профілем гвинтової поверхні деталі, що значно ускладнює методику профілювання інструменту.

Питанням профілювання інструменту для обробки гвинтових поверхонь присвячено значну кількість публікацій. Розроблено багато особливих методів профілювання, найбільш відомими з яких є методики П.Р. Родіна, С.Л. Лашнева, Г.Н. Кірсанова [1–3]. Викладені методики є узагальненими для гвинтових поверхонь, утворених будь-яким інструментом. Тим часом, більшість стружкових гвинтових канавок на металорізальному інструменті утворюється за допомогою інструменту, що має конічну форму (фрези та шліфувальні абразивні круги). Отже, застосування узагальнених методик призводить до значних ускладнень при розв'язанні конкретних задач.

Незважаючи на широке опрацювання методик профілювання інструменту, істотною проблемою є знаходження профілю деталі, утвореної інструментом з наперед заданим профілем. Суть проблеми полягає в тому, що більшість існуючих методик розроблено для узагальненого випадку, де оперують з такими поняттями, як нормаль і дотична до профілю інструменту, які досить складно визначити, особливо в умовах багатоваріантності розв'язання математичної задачі.

Постановка задачі

Метою даної статті є розробка графоаналітичної та на її базі аналітичної методики визначення огинаючої до первинної інструментальної поверхні, що має конічну форму, при її

гвинтовому русі. Проведено аналіз умов, які впливають на утворення перехідних кривих.

Загальні відомості

Будемо розглядати схему формоутворення, що складається з руху обертання первинної інструментальної поверхні навколо своєї осі та гвинтового руху деталі вздовж осі, яка паралельна осі конуса, але яка не збігається з нею. Обертання первинної інструментальної поверхні навколо своєї осі зумовлює її ковзання "самої по собі" і може не враховуватися. Отже, розглядатимемо тільки складові гвинтового відносного руху інструменту та деталі [4–7].

Для виконання дослідження використовуватимемо графічну інтерпретацію кінематичного методу [8], відповідно до якого в точці контакту поверхні деталі D і поверхні інструменту I вони мають спільну дотичну площину, в якій лежить вектор швидкості їх відносного руху.

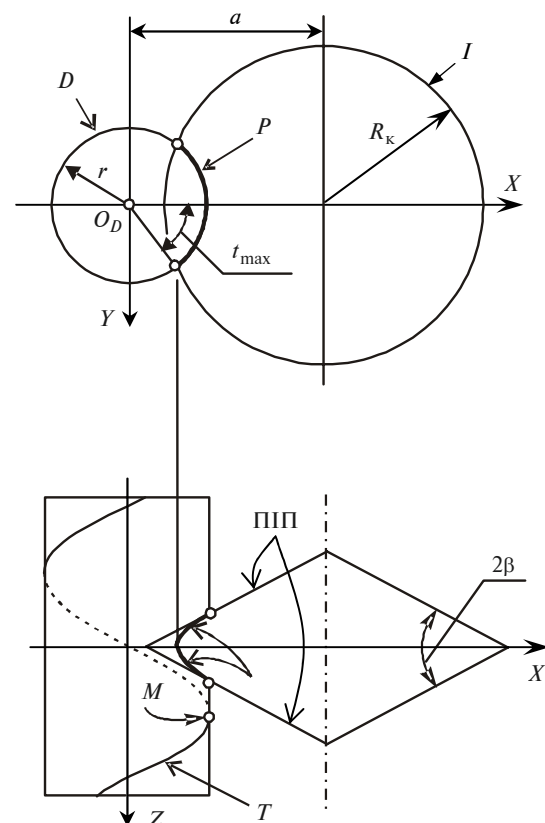


Рис. 1. Системи координат та ППП

На деталі візьмемо довільну точку M , яка розташована на радіусі r від осі гвинтового руху (рис. 1). При гвинтовому русі деталі точка

M опише в просторі гвинтову траєкторію T з кроком H . Ця траєкторія лежить на циліндрі радіуса r , вісь якого збігається з віссю гвинтового руху. Отже, відносно деталі точка контакту E знаходиться на лінії T , яка в свою чергу розташована на циліндрі радіуса r .

Тепер розглядатимемо інструментальну поверхню. Конічна поверхня інструменту I під час формоутворення перетинається з циліндром радіуса r по кривій P . Отже, відносно інструментальної поверхні точка контакту E знаходиться на лінії P . При цьому, де саме розташована точка контакту E — на лінії P чи на траєкторії T циліндра радіуса r — заздалегідь невідомо.

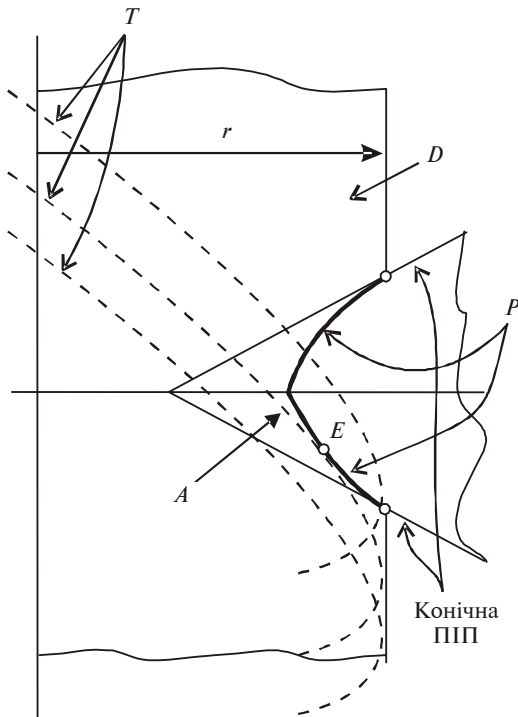


Рис. 2. Точка контакту траєкторій

Відповідно до кінематичного методу на лінії P та траєкторії T необхідно знайти таку точку E , в якій вони мають спільну дотичну. Фактично для цього потрібно, щоб траєкторія T торкнулася лінії P . На рис. 2 така траєкторія позначена стрілкою A . Точка торкання траєкторії T та лінії P і буде точкою контакту E , адже в цій точці вони матимуть спільну дотичну. Таким чином, щоб знайти точку E , необхідно перенести траєкторію T вздовж осі гвинтового руху Z , поки вона не торкнеться лінії P , яка належить інструментальній поверхні і є слідом перетину конічної ПП з циліндром радіуса r .

У цьому випадку автоматично виконається перша умова кінематичного методу про існування точки контакту двох спряжених поверхонь, а саме дотик та одночасна відсутність взаємного перетину інструментальної поверхні і поверхні деталі.

Тепер розглянемо другу умову формоутворення: вектор швидкості відносного гвинтового руху поверхонь D деталі та інструменту I збігається із спільною дотичною. У нашому випадку ця умова також виконується, оскільки в кожній точці гвинтової траєкторії T напрям швидкості руху точки по цій траєкторії збігається з дотичною до самої траєкторії.

У досліджуваній схемі формоутворення інструментальна поверхня — це сукупність двох конічних поверхонь, які перетинають одна одну по радіусу основи конуса R_k . Це коло, утворене перетином двох конічних поверхонь, також бере участь у формоутворенні поверхні деталі, утворюючи перехідну поверхню.

Введемо систему координат XYZ . Вісь Z збігається з віссю гвинтового руху. Відстань між осями інструменту I та деталі D позначимо a . Вісь X проходить одночасно через вісь гвинтового руху та вісь обертання інструменту.

Положення точки, що належить до гвинтової траєкторії T , в системі координат XZY визначається так:

$$Y_T = r \sin t, \quad Z_T = -pt, \quad p = H/2\pi, \quad (1)$$

де параметр t є змінним параметром; H — крок гвинтової траєкторії T , однаковий для всіх точок гвинтової поверхні.

Положення точки, що належить до лінії P , утвореної перетином конічної інструментальної поверхні з циліндром радіуса r та розташованої у площині XZ , визначається координатами Z_P і Y_P :

$$Z_P = (R_k - \sqrt{a^2 + r^2 - 2a r \cos t}) \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

$$Y_P = Y_T.$$

Треба враховувати, що залежності (2) визначають тільки проекцію лінії P на площину XZ .

Графоаналітичний метод

Графоаналітичний метод визначення огинаючої гвинтового руху конічної інструментальної поверхні складається з двох етапів: пер-

ший – пошук точки контакту E ; другий – пошук профілю деталі в її осьовому перерізі.

На першому етапі креслять проекції лінії P та траєкторії T і визначають точку E їх взаємного дотику, на другому – точка E переноситься по гвинтовій траєкторії в осьову площину деталі.

Отже, потрібно виконати дії в такій послідовності.

На першому етапі необхідно прийняти ряд послідовних значень радіуса r для розрахункових точок, що належать торцевому профілю конічної інструментальної поверхні.

Для кожного незмінного значення $r = \text{const}$, беручи ряд послідовних значень параметра t , за рівняннями (1) і (2) знаходять координати Y і Z проекцій ліній P і T . Далі накреслюють лінію P , що є слідом перетину поверхні I з циліндром радіуса r , на якому лежить траєкторія T гвинтового руху розрахункової точки, та переносять лінію T паралельно самій собі вздовж осі гвинтового руху до дотику з лінією P . Нове положення лінії T позначають T_E . Точка взаємного дотику ліній P і T_E і є точкою контакту E конічної інструментальної поверхні і поверхні деталі, утвореної в результаті їх відносного гвинтового руху.

На другому етапі дослідження необхідно, не змінюючи положення лінії T_E , перенести вздовж неї точку E до збігу з віссю Z . Отримана точка D_0 є точкою, яка належить осьовому перерізу огинаючої поверхні, що належить деталі. Сукупність точок D_0 для всіх розрахункових точок утворює в площині XZ осьовий переріз деталі.

Розглянемо числовий приклад. Візьмемо: кут при основі конічної поверхні – $\beta = 0,6$ рад, відстань між осями інструмента та деталі – $a = 32,5$ мм; крок гвинтового руху – $H = 13,2$ мм, гвинтовий параметр – $p = H/2\pi = 2,10$ мм/рад, радіус R_k перетину лівої та правої сторін конічних поверхонь між собою – $R_k = 28,5$ мм. Тоді мінімальна відстань від осі деталі до кола радіуса R_k первинної інструментальної поверхні становитиме $r_{\min} = a - R_k = 32,5 - 28,5 = 4$ мм.

Для прикладу обчислимо координати осьового перерізу деталі для розрахункових точок, які мають такі радіуси: $r = 4,3$ та $r = 6,86$ мм. Результати розрахунків координат кривих P і T за рівняннями (1) і (2) для точки $r = 4,3$ мм наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Координати точки $r = 4,3$ мм

t , рад	Z_T , мм	$Y_T = Y_P$, мм	Z_P , мм
0,2	-0,42	0,854	0,138
0,3	-0,63	1,271	0,054
0,4	-0,84	1,674	-0,061
$Z_E = 0,00$ мм; $Y_E = 1,46$ мм; $Z_D = 0,73$ мм			

Як видно з таблиці, значення Z_P змінюють свій знак з додатного на від'ємний. Момент зміни знака координати Z_P відповідає моменту утворення деталі. Тому і розрахунки, і креслення варто проводити, поки координата Z_P не змінить свій знак на протилежний.

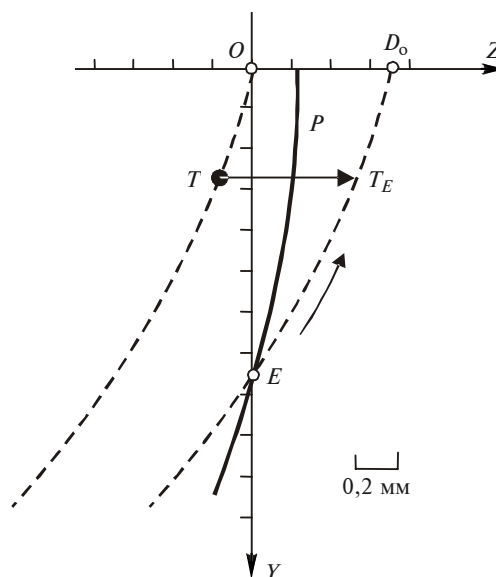


Рис. 3. Створення перехідної поверхні, коли умови формоутворення порушені

На рис. 3 наведено лінії P і T . Показано, що лінія T перенесена по горизонталі до положення T_E . Як видно з рисунка, координати точки E становлять $Z_E = 0$, $Y_E = 1,46$ мм. Проте в точці E лінії P і T_E перетинають одна одну. Тоді згідно з кінематичним методом вони повинні лише торкатися одна одної. Отже, маємо випадок створення перехідної інструментальної поверхні на деталі. Ця поверхня створена не конічною інструментальною поверхнею I , а колом радіуса R_k перетину двох сторін конусів, що утворюють поверхню I (ліва та права сторони конічного інструменту). Перенісши точку E по лінії T_E до перетину з віссю Z , отримаємо точку D_0 осьового перерізу деталі, для якої $Z_D = 0,73$ мм.

Для розрахункової точки, що має $r = 6,86$ мм, отримаємо результати, які подані в табл. 2.

Таблиця 2. Координати точки $r = 6,86$ мм

t , рад	Z_T , мм	$Y_P = Y_T$, мм	Z_P , мм
0,7	-1,470	4,419	0,609
0,8	-1,680	4,921	0,237
0,9	-1,890	5,374	-0,166
$Z_E = 1,25$ мм; $Y_E = 6,75$ мм; $Z_D = 2,4$ мм			

Для цього випадку, як видно з рис. 4, лінія T перенесена до нового положення T_E , в якому в точці E контакту інструмент-деталь дотичні до ліній P і T збігаються. Таким чином, умови формоутворення не порушуються і точка D_0 утворюється конічною поверхнею I . У такій послідовності виконують дії для інших розрахункових точок.

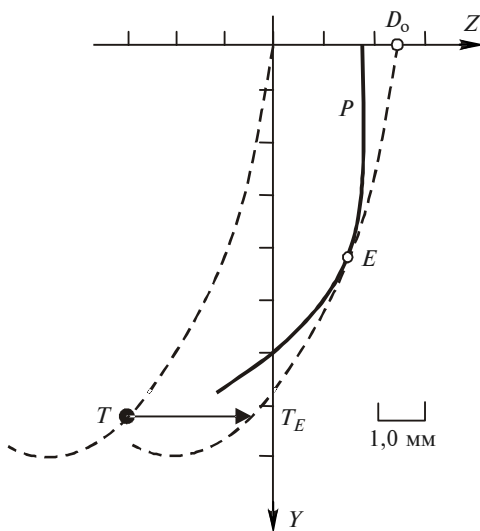


Рис. 4. Створення перехідної поверхні, коли умови формоутворення виконані

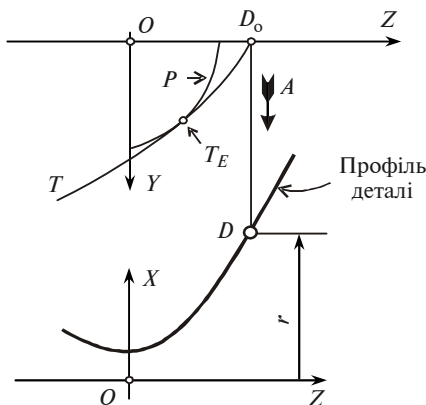


Рис. 5. Визначення профілю деталі

Профіль деталі знаходять у такий спосіб. Визначивши положення точок D_0 на осі Z , визначають профіль деталі в її осьовому перерізі. Для цього переносять точки D_0 по стрілці A в площині XZ (рис. 5) на відстань r від осі Z .

Виконавши такі послідовні дії для всіх розрахункових точок профілю інструменту, отримаємо профіль осьового перерізу гвинтової поверхні.

Аналітичний метод

Математичні залежності аналітичного методу можна вивести, виходячи з графічних побудов, які були розглянуті вище. У точці контакту E деталь і поверхня інструменту мають спільну дотичну. Отже, в цій точці кути φ_P і φ_T нахилу дотичних до ліній P і T будуть мати однакову величину. Таким чином, рівняння контакту можна записати у вигляді

$$\varphi_T - \varphi_P = 0.$$

Взявши похідні від (1) і (2) по параметру t і підставивши їх в отримане рівняння контакту, після перетворень отримаємо

$$\cos^2 t - \frac{2p^2 \cos t}{a \operatorname{arctg}^2 \beta} + \frac{p^2(a^2 + r^2)}{(a \operatorname{arctg} \beta)^2} - 1 = 0.$$

Виконаємо заміну параметрів у такий спосіб:

$$A = -\frac{2p^2}{a \operatorname{arctg}^2 \beta}, \quad B = \frac{p^2(a^2 + r^2)}{(a \operatorname{arctg} \beta)^2} - 1.$$

Тоді рівняння контакту $\varphi_T - \varphi_P = 0$ остаточно набуде вигляду

$$\cos^2 t + A \cos t + B = 0.$$

Розв'язуючи це рівняння відносно t , отримуємо

$$\cos t_{1,2} = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}.$$

З двох значень t_1 і t_2 необхідно взяти те, яке лежить у межах від нуля до t_{\max} . Значення t_{\max} визначається за формулою

$$\cos t_{\max} = \frac{a^2 + r^2 - R_k^2}{2ar}.$$

Координати точки осьового перерізу деталі (див. графічну інтерпретацію кута t_{\max} на рис. 1) визначаються за рівняннями

$$Z_D = pt + (r \cos t - r_{\min}) \operatorname{tg} \beta, \quad X_D = r. \quad (3)$$

У наведених формулах параметр r_{\min} є найменша відстань від осі деталі до кола радіуса R_k , утвореного перетином лівої і правої сторін конічної інструментальної поверхні. Отже, чисельно параметр становить $r_{\min} = a - R_k$.

Загальна послідовність аналітичного пошуку профілю деталі, утвореної конічною інструментальною поверхнею, без визначення нормалі, спільної до поверхонь інструменту і деталі, та швидкості їх відносного руху, може бути виконана в такій послідовності.

На профілі конічної інструментальної поверхні вибирається послідовний ряд розрахункових точок. Обчислюється для кожної з них значення параметра t і за рівняннями (3) визначаються координати Z_D і X_D осевого перерізу поверхні деталі.

Виконаємо аналітичні розрахунки для точок профілю інструменту, прийнятих раніше. Для точки інструменту радіуса $r = 4,3$ мм значення параметра t будуть такими:

$$\cos t_1 = 0,7267, \quad t_1 = 0,7573 \text{ рад},$$

$$\cos t_2 = -0,6625, \quad t_2 = 2,2950 \text{ рад}.$$

Найбільше значення параметра t становить $t_{\max} = 0,3507$. Як бачимо, t_1 і t_2 за своєю абсолютною величиною більші, ніж t_{\max} . Геометричне значення $t_1 = 0,7573$ рад відповідає куту, на який обернеться розрахункова точка радіуса $r = 4,3$ мм за час гвинтового руху, перш ніж торкнеться лінії P . Початкове положення цієї точки – це точка M_0 на рис. 1, значення t_2 – кут повороту точки, який доповнює значення t_1 до значення π .

Параметр $t_{1,2}$ не може бути більшим, ніж t_{\max} . Отже, якщо $|t_{1,2}| > t_{\max}$, то це означає, що в точці контакту E порушуються умови формоутворення, що призводить до появи перехідної кривої. Для подальших розрахунків $t = t_{\max}$ і одержимо $Z_D = 0,7672$ і $X_D = 4,3$ мм. Враховуючи, що в даному випадку $|t_{1,2}| > t_{\max}$ отримані координати Z_D і X_D є координатами перехідної кривої.

Для точки $r = 6,86$ мм одержимо відповідні значення:

$$\cos t_1 = 0,9097, \quad t_1 = 0,4382 \text{ рад},$$

$$\cos t_2 = -0,8694, \quad t_2 = -2,6548 \text{ рад}.$$

У даному випадку значення $t_{\max} = 0,8596$ рад.

Як бачимо, обидва значення t_1 та t_2 менші, ніж граничне значення t_{\max} . Таким чином, умова формоутворення не порушується і ми вибираємо для подальших розрахунків значення $t = t_1 = 0,4282$ рад. Отже, маємо $Z_D = 2,4142$ і $X_D = 6,86$ мм.

Перехідна крива

Визначимо аналітично значення радіуса r деталі, яка лежить на межі двох ділянок профілю – ділянки, утвореної колом радіуса R_k , і ділянки, утвореної конічною частиною первинної інструментальної поверхні. Позначимо радіус деталі, яка лежить на межі цих ділянок, як r_k (критичний радіус).

Вище було сказано, що перехідна крива виникає в разі, коли t_1 і t_2 більші, ніж t_{\max} . Таким чином, значенню радіуса r_k відповідає умова $t_{1,2} = t_{\max}$. Побудуємо графіки функцій $t_{1,2} = f_1(r)$ і $t_{\max} = f_2(r)$. Точка їх перетину відповідатиме шуканому значенню r_k , при якому $t_{1,2} = t_{\max}$. Аналіз значень $t_{1,2}$ дозволяє стверджувати, що з двох значень t_1 і t_2 можна брати те, яке отримано за залежністю $t = -A/2 + \sqrt{A^2/4 - B}$.

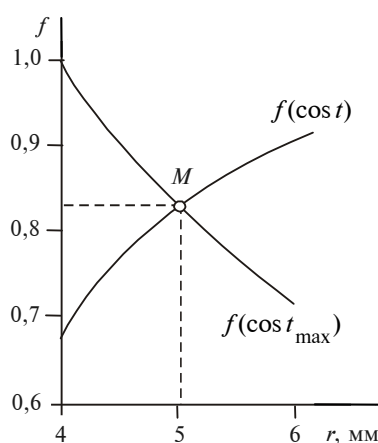


Рис. 6. Визначення критичного радіуса

Графічна інтерпретація отриманих результатів така. Оскільки за рівняннями (1) і (2) ми одержуємо косинуси кутів t , то можна побудувати безпосередньо графіки $f(\cos t)$ і $f(\cos t_{\max})$, наведені на рис. 6. За отриманими результата-

ми креслимо графік, на якому криві $f(\cos t)$ і $f(\cos t_{\max})$ перетинаються в точці M , для якої $r_k = 5,1$ мм.

Отже, для точок деталі, які мають радіуси, менші за $r_k = 5,5$ мм, профіль деталі є перехідною кривою, утвореною частиною кола радіуса R_k . Для точок, для яких $r > r_k$, профіль деталі, утворений конічною первинною інструментальною поверхнею I , перехідних кривих не має.

Висновки

Аналіз результатів дослідження методик визначення профілю поверхні, утвореної конічним інструментом при його гвинтовому русі відносно деталі, дає змогу зробити такі висновки.

Розроблені графоаналітична та аналітична методики дозволяють знайти осьовий профіль

гвинтової поверхні за графоаналітичною методикою без пошуку нормалі, спільної для спряжених профілів у точці їх контакту. За аналітичною інтерпретацією графоаналітичного методу можна визначити на утвореній гвинтовій поверхні граничні точки появи перехідної ділянки, що значно спрощує процес проектування інструменту. Запропонована аналітична методика дозволяє знаходити момент появи перехідної поверхні, яка виникає в западині гвинтової поверхні, утвореної конічною ПП.

Отримані результати можуть бути використані при профілюванні дискових інструментів для утворення гвинтових поверхонь. Перспективою подальших досліджень є визначення товщини матеріалу, що видаляється окремими ділянками конічної поверхні інструменту при його роботі.

В.И. Солодкий, Е.В. Довжик

ФОРМИРОВАНИЕ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНИЧЕСКОЙ ИСХОДНОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассмотрена методика определения профиля винтовой поверхности детали, образованной коническим инструментом. Кинематическим методом проанализированы условия образования двух сопряженных поверхностей.

V.I. Solodkiy, Ye.V. Dovzik

FORMING THE SPIRAL SURFACE BY THE INITIAL CONICAL INSTRUMENTAL SURFACE

This study reveals the methods of determining the type of spiral surface of the detail by a conical instrument. By utilizing the kinematic method, we analyze the conditions of two coupled surfaces formation.

1. Лашнев С.Л., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. — М.: Машиностроение, 1980. — 208 с.
2. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов. — К.: Вища шк., 1990. — 424 с.
3. Руководство по курсовому проектированию металло-режущих инструментов: Учеб. пос. / Под ред. Г.Н. Кирсанова. — М.: Машиностроение, 1968. — 288 с.
4. Равская Н.С., Родин П.Р., Солодкий В.И. Кинематическое исследование условий контакта сопряженных поверхностей // Вест. НТУУ "КПИ". Машиностроение. — 2001. — Вып. 41. — С. 3–9.
5. Родин П.Р., Солодкий В.И. Формоутворення гвинтових поверхонь торцевим інструментом із профілюючою

вершинною точкою // Наукові вісті НТУУ "КПИ". — 2004. — № 6. — С. 57–62.

6. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. — М.: Машиностроение, 1967. — 370 с.
7. Шаламов В.Г., Резниченко К.А. Совершенствование методики профилирования винтовых поверхностей // Изв. Челябин. науч. центра. — 2006. — Вып. 4 (34). — С. 52–58.
8. Крутицкий А.С. Формообразование винтовых поверхностей дисковым инструментом с использованием каркасно-кинематического метода: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тула: ТулГУ, 2004. — 16 с.